

К ВОПРОСУ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ ШАХТЫ ПРОВОЛОКОЙ

(Сокращенное изложение)

А. И. ВОЛКОВ

Введение

Измерение глубины шахты входит в комплекс капитальных маркшейдерских работ. С помощью этой задачи производится передача координаты зет через вертикальный ствол в рудник. Координата зет имеет большое значение как в вопросе пространственного изображения месторождения, так и при решении некоторых ответственных маркшейдерских задач и в первую очередь при проведении сбоек. С целью обеспечения соответствующей точности определения координаты зет, работа по измерению глубины шахты производится с учетом ряда факторов, влияющих на точность решения этой задачи.

В настоящее время измерение глубины шахты осуществляется следующими способами: 1) длинной стальной лентой, 2) короткой стальной лентой, 3) стальной проволокой.

Из указанных способов первый обеспечивает наивысшую точность, прост в исполнении и является наиболее производительным. Сравнительно слабое распространение его в практике объясняется необходимостью иметь специальные шахтные ленты длиной до 1000 м. На втором месте по точности, простоте исполнения и производительности стоит третий способ. Этот способ, как обеспечивающий необходимую точность, достаточно высокоую производительность и не требующий специальной аппаратуры, является почти единственным, применяемым в настоящее время способом. На последнем месте по точности, производительности и сложности исполнения стоит второй способ. По указанным выше соображениям этот способ в практике почти не применяется.

Техника исполнения полевых работ для каждого из указанных способов разработана достаточно хорошо, в вопросе же обработки результатов измерения глубины проволокой дело обстоит далеко неблагоприятно. Это неблагоприятие обращает на себя внимание уже при беглом просмотре литературы по данному вопросу. Действительно, „Техническая инструкция по производству маркшейдерских работ“ и курс проф. Д. Н. Оглоблина „Маркшейдерская съемка горных выработок“ требуют введения в измеренную длину проволоки следующих поправок: а) за счет растяжения проволоки от собственного веса¹⁾ б) за счет температуры проволоки и в) за счет компарирования.

Согласно „Маркшейдерским формулярам по производству соединительных съемок“, опубликованным в № 11 „Трудов ЦНИМБ“, измеренная длина проволоки должна быть исправлена за счет: а) растяжения проволоки от собственного веса, б) температуры проволоки, в) температуры ленты и г) компарирования.

¹⁾ Формула для вычисления этой поправки в инструкции не приводится.

Более детальное изучение в настоящей работе данного вопроса позволило установить ряд недочетов в вычислении температурных поправок и полностью забраковать формулу, рекомендованную указанной выше литературой для вычисления поправки за растяжение проволоки от действия собственного веса.

Целью настоящей работы является изучение источников погрешностей, влияющих на результат измерения глубины шахты проволокой, и указание путей к исключению или смягчению этого влияния.

Источники погрешностей при измерении глубины шахты проволокой

Основной недостаток способа измерения глубины шахты проволокой состоит в том, что отдельные измерительные операции производятся неодновременно и при различных состояниях проволоки. В подтверждение этого достаточно указать, что нанесение меток на проволоку производится в отвесном положении ее при температуре, соответствующей температуре воздуха ствола шахты, и натяжении, когда, кроме груза, действует собственный вес всей проволоки, а измерение производится по частям, на поверхности, при горизонтальном положении проволоки и, следовательно, при иной температуре и натяжении.

Более детальное изучение этого вопроса позволяет установить следующие источники погрешностей¹⁾ для первого и второго способов измерения глубины шахты проволокой в отдельности²⁾.

Для первого способа измерения эти источники будут за счет:

- 1) неправильной оценки температуры проволоки в стволе шахты и на поверхности;
- 2) разности температур проволоки и ленты при измерении отдельных отрезков проволоки;
- 3) действия собственного веса проволоки;
- 4) дополнительного растяжения (от времени) проволоки после нанесения меток (от действия груза и собственного ее веса);
- 5) трения в блоках;
- 6) продольных колебаний проволоки;
- 7) изменения силы тяжести с глубиной;
- 8) неточного знания длины ленты (компаратора).

Для второго способа измерения сохраняются все перечисленные выше источники погрешностей первого способа. Кроме того, здесь мы имеем следующие дополнительные источники:

- 1) за счет разности стрел провеса проволоки на участке $D - T$ в начале и в конце измерения (фиг. 2),
- 2) за счет смещения ленты-компаратора в процессе измерения отдельных отрезков проволоки.

При рассмотрении вопроса об источниках погрешностей имелось в виду, что измерение производится с соблюдением основных условий, заключающихся в следующем: а) при измерении проволока находится в горизонтальном положении; б) натяжение ленты равно натяжению ее при компарировании; в) лента при измерении занимает положение, аналогичное тому, какое она занимала при компарировании (горизонтальное или со свободным провесом).

¹⁾ Погрешность, зависящая от отсчитывания по ленте и рейкам, присущая всем измерительным операциям, не рассматривается.

²⁾ Существует два способа измерения глубины шахты проволокой, первый из которых описан в книге проф. И. М. Бахурина „Маркшейдерское искусство“ (дополнение к курсу „Маркшейдерское искусство“), второй — в книге проф. Д. Н. Оглобина „Маркшейдерская съемка горных выработок“.

При отступлении от указанных условий возникают дополнительные источники погрешностей, учитываемые по известным формулам.

Погрешность за счет неправильной оценки температуры проволоки в стволе шахты и на поверхности

Определение времени приобретения проволокой температуры окружающего ее воздуха

Для выполнения различных измерительных операций проволока перемещается из одних температурных условий в другие. Так, для нанесения меток она спускается в шахту, имея температуру поверхности, а для измерения длины между метками поднимается на поверхность, имея температуру воздуха ствола шахты. Попадая в иные температурные условия, проволока постепенно изменяет свою температуру и с течением времени приобретает температуру окружающего ее воздуха. В этот момент и должно производиться измерение ее или нанесение меток, а также фиксирование конца измерений при втором способе измерения. Преждевременное выполнение тех или иных измерительных операций ведет к искажению результата.

Рассматривая температурный режим проволоки в процессе измерения глубины, проф. И. М. Бахурин в своей работе „Вопросы маркшейдерского искусства“ (дополнение к курсу „Маркшейдерское искусство“) писал:... „причем учесть это изменение температуры нелегко, так как проволока не сразу, а с некоторым запаздыванием воспринимает температуру окружающей среды“. В позднейших работах других авторов, рассматривающих измерение глубины шахты, мы также не находим ответа на вопрос, как определить время, в течение которого наступает равенство температур проволоки и окружающего ее воздуха.

Пользуясь данными теплотехники, расчет времени, в течение которого наступает равенство температур проволоки и окружающего ее воздуха, может быть произведен по следующим формулам:

При нагревании проволоки

$$t_h = \frac{0,576 \cdot d c \gamma}{\alpha} \cdot \lg \frac{t_b^0 - t_0^0}{t_b^0 - t_{0,h}} \quad (1)$$

При охлаждении проволоки

$$t_h = \frac{0,576 d c \gamma}{\alpha} \cdot \lg \frac{t_0^0 - t_b}{t_{0,h}^0 - t_b^0}, \quad (2)$$

где α — коэффициент теплопередачи от воздуха к металлу;

c — теплоемкость металла;

γ — удельный вес материала;

t_b^0 — температура воздуха, окружающего проволоку при измерении;

$t_{0,h}^0$ — температура проволоки через некоторый отрезок времени t_h после подъема её на поверхность;

t_0^0 — исходная температура проволоки;

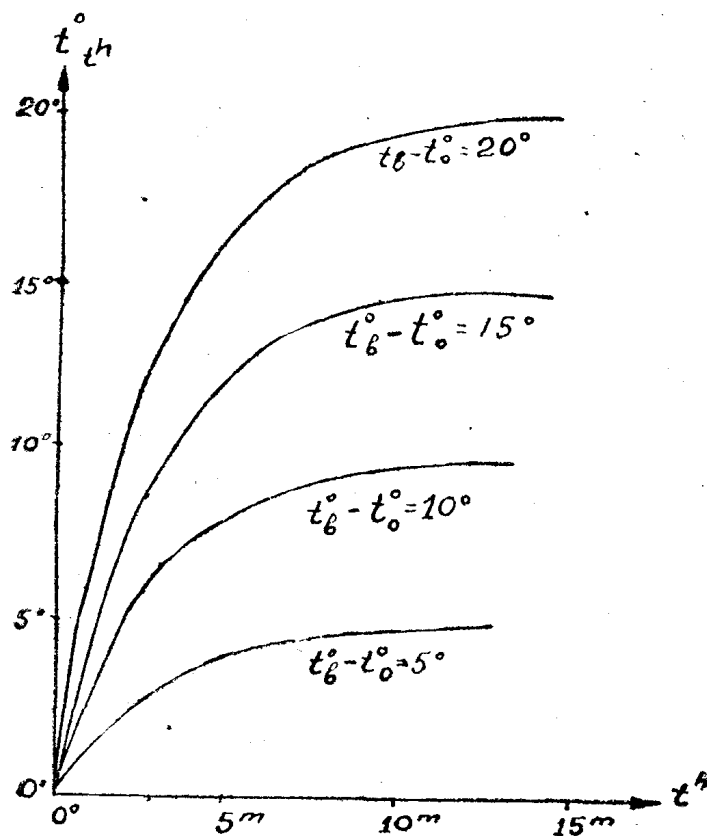
d — диаметр проволоки.

На фиг. 1 приведены кривые, характеризующие время, в течение которого происходит нагревание (или охлаждение) проволоки при различных разностях температур проволоки и окружающего ее воздуха. Из этих кривых следует, что нагревание (охлаждение) при разности температур в 20°

происходит в течение примерно 15^m , уменьшаясь до 10^m при разности температур в 5° .

Приведенные теоретические соображения о времени нагревания (охлаждения) проволоки показывают, что неучет этого обстоятельства может привести к серьезным искажениям результата.

График
времени нагрева стальной проволоки $d=1,5$ мм
при заданной разности температур
 $t_b - t_0$



Фиг. 1

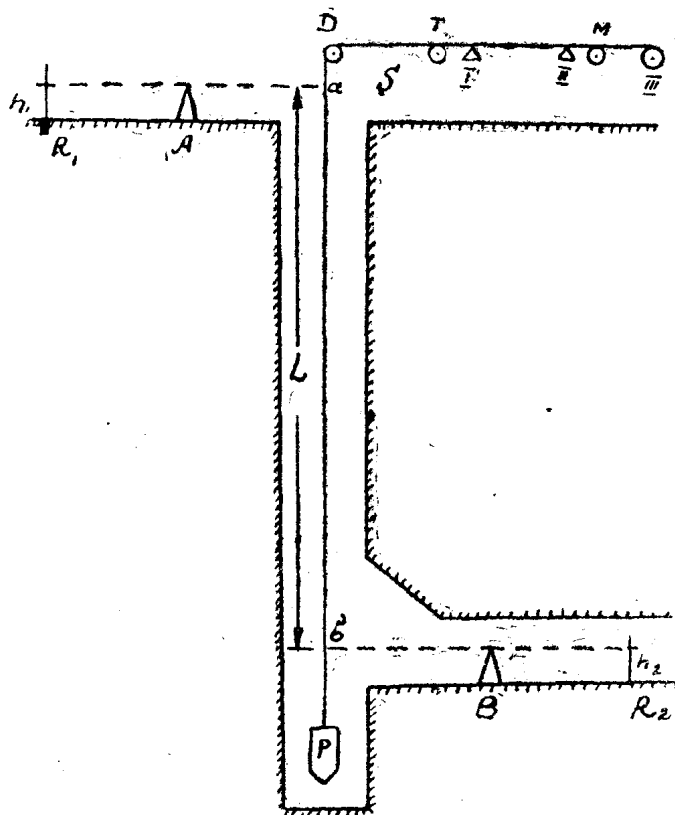
При построении кривых были приняты следующие значения входящих в формулы величин: $d=0,0015$ м, $\alpha=9 \frac{\text{кал}}{\text{м}^2 \text{ и.г}}$ при скорости воздушной струи в 1 м/сек, $c=0,13 \frac{\text{кал}}{\text{кг}^\circ\text{Ц}}$, $\gamma=7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Определение средней температуры проволоки в стволе и на поверхности

Из приведенных ниже графиков температурного режима воздуха в стволе шахты (фиг. 3—7) видно, что температура воздуха в верхней части ствола не остается постоянной, а изменяется с изменением горизонта. Таким образом, вопрос определения температуры проволоки в стволе шахты является сложным вопросом, и неправильное решение его может привести к значительному искажению результата.

В настоящее время за температуру проволоки в стволе шахты рекомендуется принимать среднее значение ее из измерений в устье ствола шахты

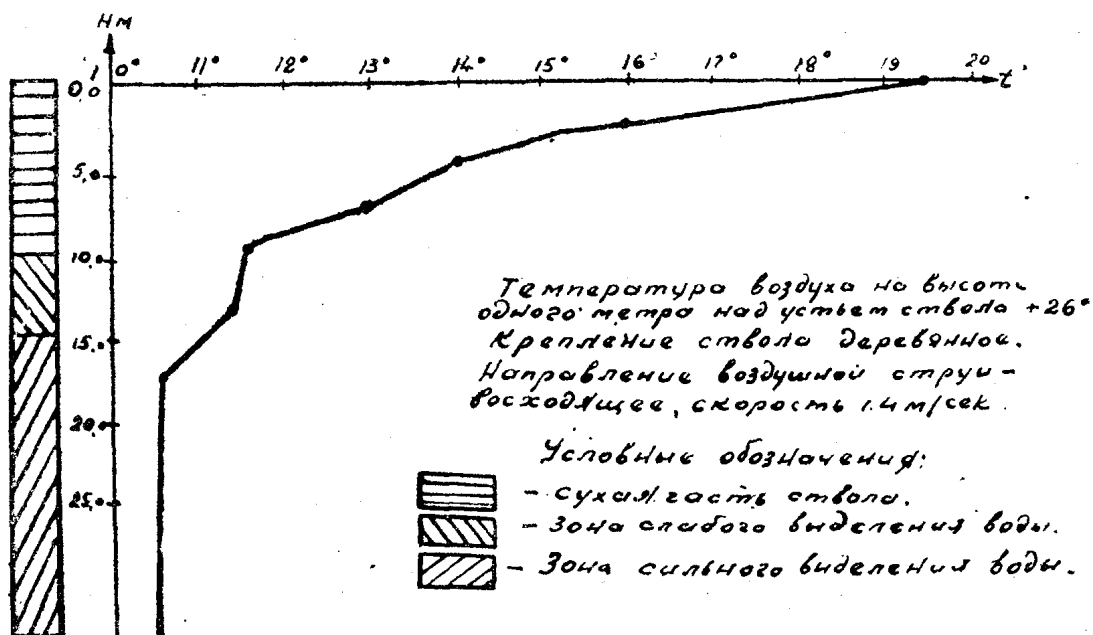
и на горизонте рудничного двора или на горизонте рудничного двора и в районе верхней метки (точка „а“ фиг. 2). Таким образом, этот способ определения средней температуры допускает, что изменение температуры



Фиг. 2

провода от верхней метки до горизонта рудничного двора происходит по закону прямой.

График
температурного режима воздуха в стволе шурфа 11бис
шахта 5/7 треста „Анжероуголь“



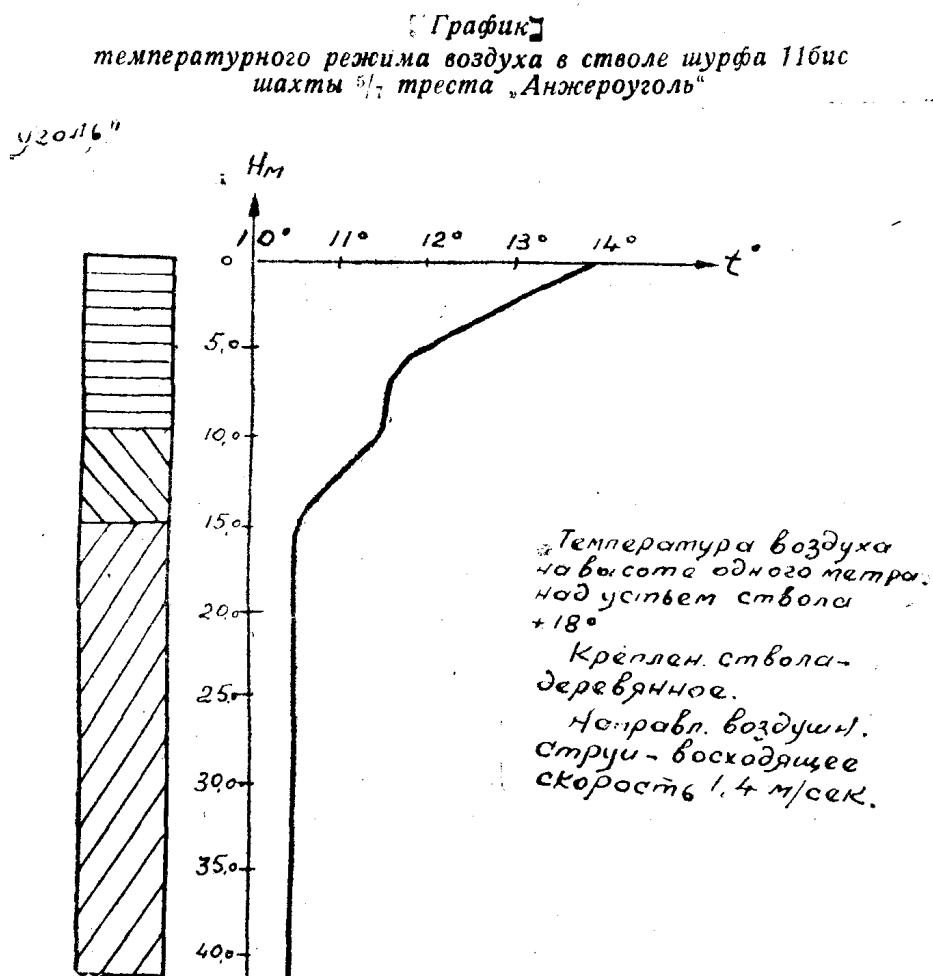
Фиг. 3

С целью выяснения действительной картины изменения температуры проволоки на участке верхняя метка—рудничный двор нами были проведены в августе 1945 г. специальные наблюдения на шахтах треста „Анжероуголь“ по изучению температурного режима воздуха в стволе шахты.

Из графиков фиг. 3—7, построенных по результатам указанных выше наблюдений, следует, что это изменение, в общем случае, подчинено закону кривой. Из тех же графиков видно, что основными факторами, влияющими на температурный режим воздуха в стволе шахты, являются следующие:

- 1) разность температур воздуха в руднике и на поверхности,
- 2) направление воздушной струи,
- 3) скорость воздушной струи,
- 4) наличие капежа в стволе.

Перечисленные факторы различно влияют на температурный режим воздуха в стволе шахты. Одни из них выравнивают кривую температурного режима, другие, наоборот, усиливают ее контрастность. Большая



Фиг. 4

скорость воздушной струи, нисходящее ее направление, отсутствие капежа выравнивают температурную кривую до прямой (фиг. 7). Незначительная скорость воздушной струи, восходящее направление ее и высокая температура воздуха над устьем ствола усиливают кривую, как это видно из сравнения графиков (фиг. 3 и 4). Наличие капежа резко понижает температуру и, следовательно, усиливает контрастность кривой распределения температур воздуха в стволе шахты (фиг. 5 и 6).

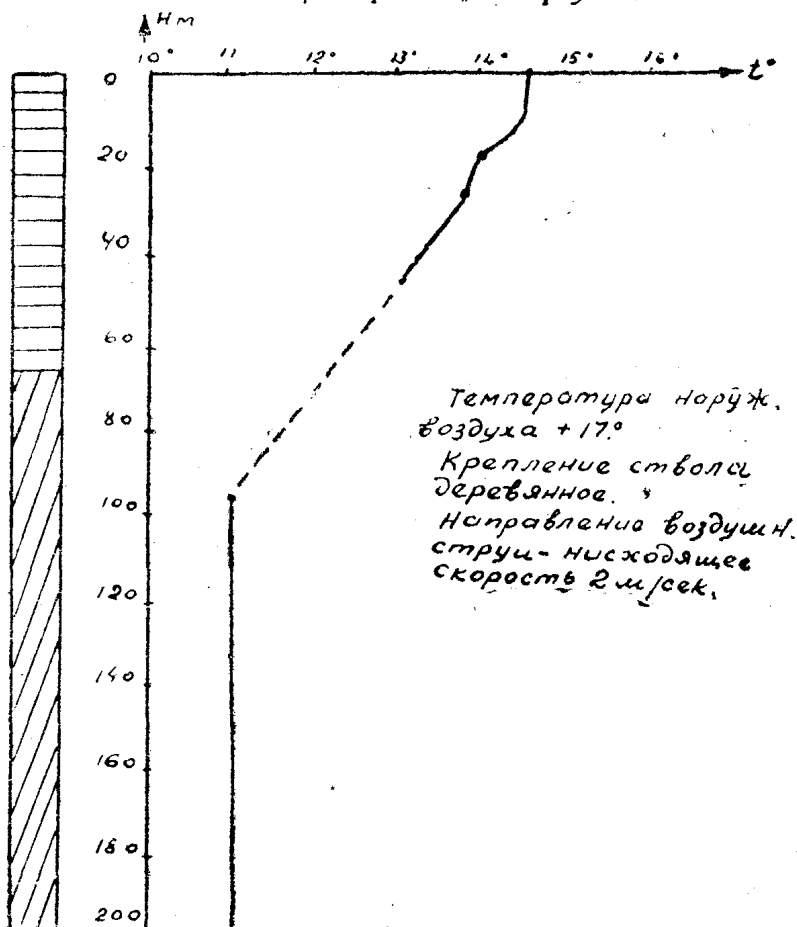
Приведенные исследования показывают, что за среднюю температуру воздуха в стволе шахты нужно принимать не среднее арифметическое по наблюдениям в двух точках, а среднее взвешенное по длинам из наблюдений температуры воздуха в ряде точек по формуле

$$t_c = \frac{t_1 L_1 + t_2 L_2 + \dots + t_n L_n}{L_1 + L_2 + \dots + L_n} \quad (3)$$

где значение t_1, t_2, \dots, t_n есть средняя температура проволоки на участках L_1, L_2, \dots, L_n , так, $t_1 = \frac{t'' + t'}{2}$, $t_2 = \frac{t' + t''}{2}$ и т. д. (фиг. 8). L_1, L_2, \dots, L_n

выбираются из такого расчета, чтобы изменение температуры в пределах каждого из этих участков было близко к закону прямой.

График
температурного режима воздуха в лесоспускном стволе
шахты 9/15 треста "Анжероуголь"



Фиг. 5

Для сравнения результатов вычисления средней температуры проволоки в стволе шахты по принятому в настоящее время способу и по формуле (3) воспользуемся данными графика фиг. 3. На основании этих данных получим:

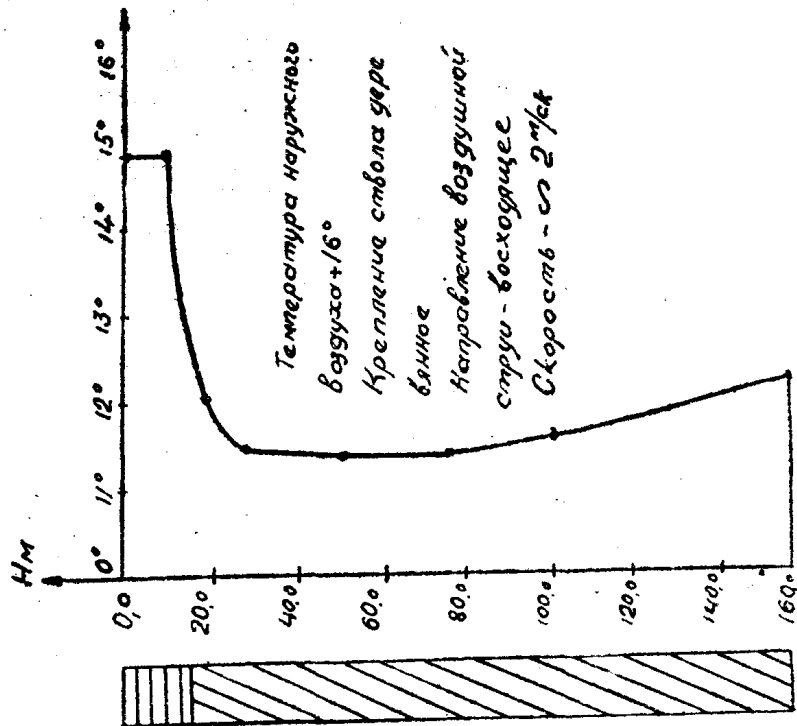
а) по существующему способу $t_c = 17,8^\circ$,

б) по формуле (3) для глубины 43 м $t_c = 12,4^\circ$,

что составляет разницу средних температур проволоки в исходном ее

положении в $5,4^{\circ}$. При глубине в 200 м при условии, что ниже температура остается равной $10,5^{\circ}$, эта разница достигает 7° , что соответ-

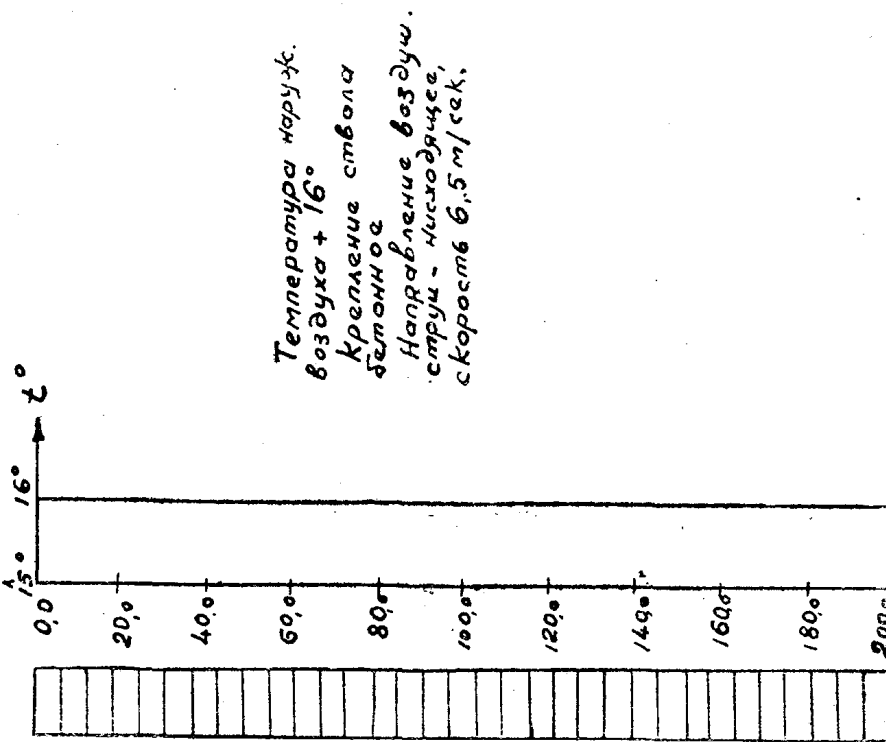
График
температурного режима воздуха в
стволе шахты 9 треста "Анжеро-Судженск"



Фиг. 6

ствует разности поправок к измеренной длине проволоки в 1,7 см. Из приведенного примера следует, что точность результата измерения глу-

График
температурного режима воздуха в стволе
№ 6. шахты 5/7 треста "Анжеро-Судженск"



Фиг. 7

бины шахты в значительной степени зависит от точности определения средней температуры проволоки в исходном ее положении.

Формула (3) позволяет вычислить среднюю температуру проволоки в исходном ее положении (в стволе) с любой степенью точности. Это достигается увеличением числа точек, в которых производится измерение температуры воздуха в стволе шахты.

Измерение длины проволоки между метками на компараторе, как известно, производится по частям. Из этого следует, что температура отдельных отрезков при измерении может быть различной вследствие колебания температуры воздуха.

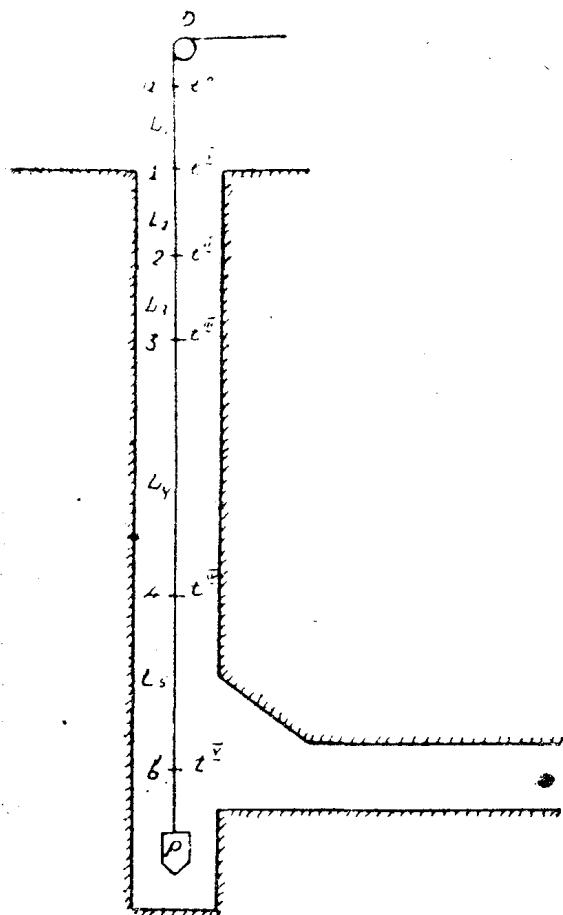
Средняя температура проволоки при измерении ее на компараторе может быть вычислена по формуле

$$t_u = \frac{l_1 t_1 + l_2 t_2 + \dots + l_n t_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n}, \quad (4)$$

где t_1, t_2, \dots, t_n температура отдельных отрезков $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ в момент их измерения на компараторе.

Так как обычно $l_1 \cong l_2 \cong \dots \cong l_n = l$, то средняя температура проволоки в момент измерения может быть вычислена по формуле

$$t_u = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n}, \quad (5)$$



Фиг. 8

Вычисление температурных поправок

Зная среднюю температуру проволоки в стволе и при измерении ее на компараторе, можно вычислить поправку к измеренной длине проволоки за счёт изменения температуры по формуле

$$\Delta L_{t_n} = L k_1 (t_c - t_u), \quad (6)$$

где L — общая измеренная длина проволоки,

k_1 — линейный коэффициент расширения материала проволоки.

Измерение длины проволоки на компараторе производится при средней температуре t_u , длина же компаратора ленты может быть известна при иной температуре, например, t_0 . Образовавшаяся таким образом разность температур составляет новый источник погрешности измерения глубины шахты проволокой. Эта погрешность может быть учтена по формуле

$$\Delta L_{t_l} = L k_2 (t_u - t_0), \quad (7)$$

где k_2 — линейный коэффициент расширения материала ленты.

Общая температурная поправка к измеренной длине проволоки равна сумме поправок за температуру проволоки и ленты, т. е.

$$\Delta L_t = \Delta L_{t_n} + \Delta L_{t_l}$$

Так как при измерении глубины шахты применяется стальная проволока, то линейный коэффициент расширения проволоки и ленты принимается одинаковым, т. е.

$$k_1 = k_2 = k.$$

При этих условиях общая температурная поправка к измеренной длине проволоки может быть вычислена по формуле

$$\Delta L_t = Lk(t_c - t_0). \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что если линейный коэффициент расширения материала проволоки и ленты одинаков, то температура t_u , при которой происходит измерение проволоки на компараторе, не оказывает влияния на определение глубины шахты. В формулы (6) и (7) в этом случае т.е. когда $k_1 = k_2$, может быть подставлено любое произвольное значение t_u .

Точность определения общей температурной поправки к измеренной длине проволоки по формуле (8) зависит главным образом от точности определения t_0 .

Погрешность за счет действия собственного веса проволоки

Анализ применяемой в настоящее время формулы для вычисления ΔL_q

По поводу влияния собственного веса q проволоки проф. И. М. Бахурин в работе „Вопросы маркшейдерского искусства“ (дополнение к курсу „Маркшейдерское искусство“) писал: „По мере поднятия груза P (отвес) натяжение участков проволоки, перешедших за ролик D (фиг. 2), будет уменьшаться, и проволока будет уменьшать свою длину по сравнению с той, которая была в вертикальном положении DP . Величина происходящей от этой причины погрешности подлежит изучению и еще недостаточно известна“.

В опубликованных в 1940 г. „Маркшейдерских формулярах по производству соединительных съемок“ (Известия ЦНИМБ № 11) и в упомянутом выше курсе проф. Д. Н. Оглоблина это изменение длины проволоки предлагается учитывать по следующей формуле:

$$\Delta L_{q.m} = \frac{\gamma}{20 E} L^2, \quad (9)$$

где L — измеренная длина проволоки,

γ — удельный вес материала проволоки,

E — модуль упругости материала проволоки.

Приведенный ниже анализ показывает, что формула (9) не выражает истинного закона изменения длины проволоки под влиянием собственного веса q в период ее измерения и дает значительно преувеличенную величину поправки. Чтобы убедиться в сделанном выводе, проанализируем формулу (9). Удлинение элементарного отрезка проволоки dx (фиг. 9) под действием нижевисящей ее части длины x выражается согласно закону Гука следующим образом:

$$\Delta(dx) = \frac{\gamma x dx}{E},$$

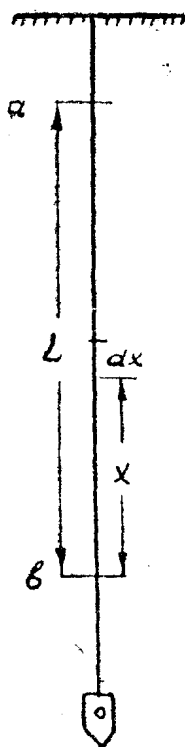
откуда общее удлинение ΔL_q проволоки под действием собственного веса q равно

$$\Delta L_q = \frac{\gamma}{E} \int_0^L x dx = \frac{\gamma}{E} \frac{L^2}{2}.$$

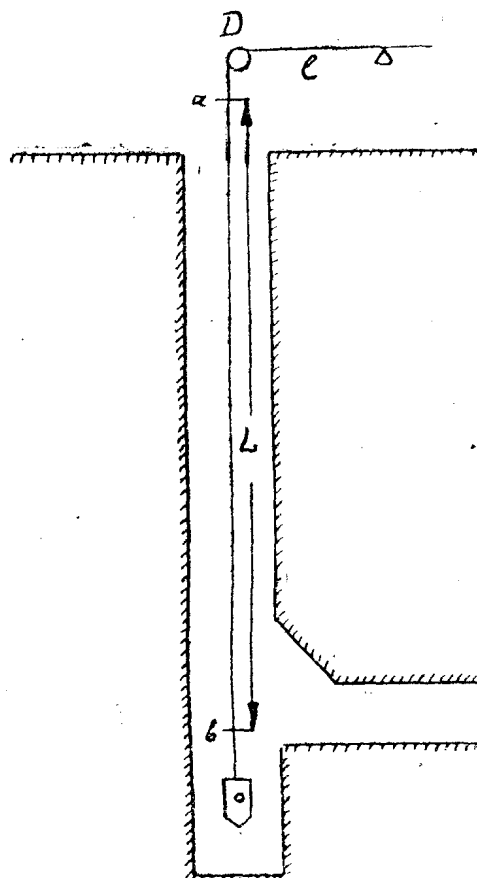
В полученном уравнении входящие величины выражены в системе CGS. Принимая E в кг/см^2 , а линейные величины в м , будем иметь

$$\Delta L_{q,u} = \frac{\gamma}{20 E} L^2.$$

Из вывода формулы следует, что применение ее к вычислению поправки на растяжение проволоки от действия собственного веса возможно только в том случае, когда измеряемый отрезок L , находящийся в вертикальном положении при нанесении меток, предварительно (до измерения) будет переведен в горизонтальное положение, а затем измерен. В этом случае собственный вес d измеряемого отрезка проволоки L перестанет действовать, и она сократится на величину ΔL_q , вычисляемую по формуле (9). Однако, как известно, такой способ измерения длины проволоки в прак-



Фиг. 9



Фиг. 10

тике не имеет места. Измерение проволоки, как указано выше, производится по частям, путем последовательного ее подъема или спуска. Указанные выше соображения относительно неприменимости формулы (9) для вычисления поправки ΔL_q при измерении глубины шахты проволокой могут быть подтверждены следующим образом. Пусть измерение длины проволоки между метками a и b производится от точки D (фиг. 10). Поправка за растяжение от собственного веса q проволоки для каждого отдельно измеренного отрезка l согласно формуле (9) равна

$$\Delta l_{q,u} = \frac{\gamma}{20 E} l^2.$$

Общая поправка ΔL_{qm} к измеренной длине L равна сумме отдельных поправок к отрезкам l

$$\Delta L_{qm} = \frac{\gamma}{20E} \sum l^2.$$

Если при измерении отдельные отрезки l были равны между собой, то будем иметь

$$\Delta L_{q,u} = \frac{\gamma}{20E} L l, \quad (10)$$

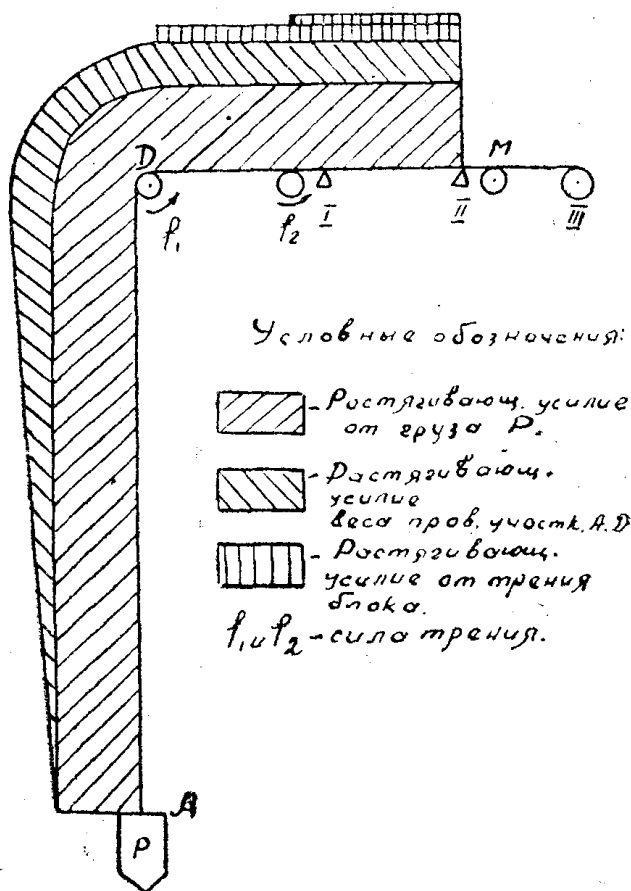
где $L = nl$,

Полученная формула (10) является строгой, однако, только для случая, показанного на фиг. 10, т. е. когда измерение отдельных отрезков производится от точки D (точка подвеса проволоки).

Сравнение формулы (10) с формулой (9) показывает их резкое различие. Это объясняется тем обстоятельством, что формула (10) учитывает способ измерения длины проволоки по частям, а формула (9) не учитывает этого. В этом состоит основной недостаток формулы (9).

Вывод формул поправки ΔL_q

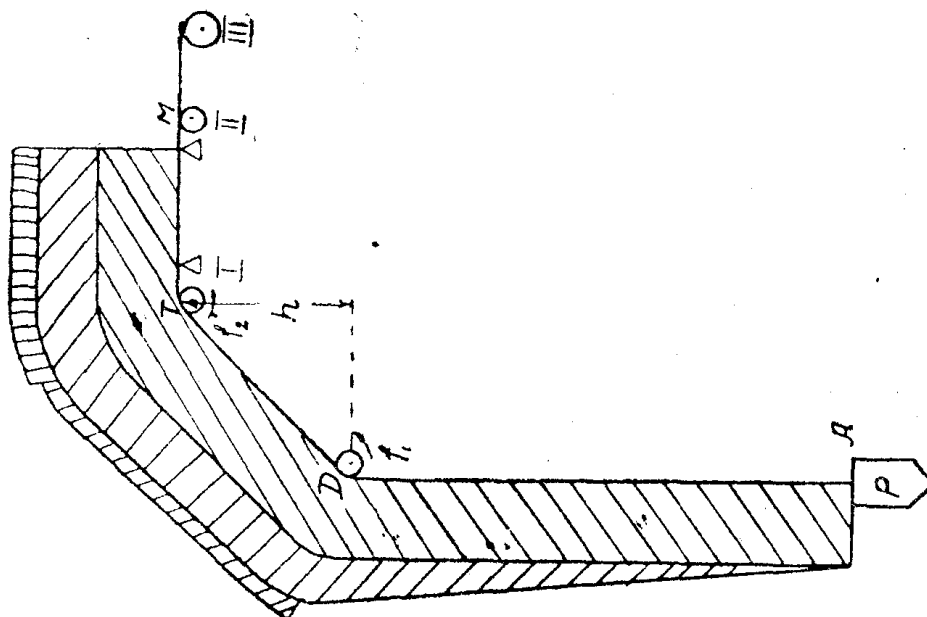
На фиг. 11, 12, 13 приведены схематические графики растягивающих усилий, действующих на проволоку под влиянием различных факторов. Из рассмотрения графиков следует:



Фиг. 11

1) растягивающее влияние груза P постоянно на протяжении всей длины проволоки и не зависит от того, в каком положении находится проволока: в вертикальном или горизонтальном (без учета трения в блоках);

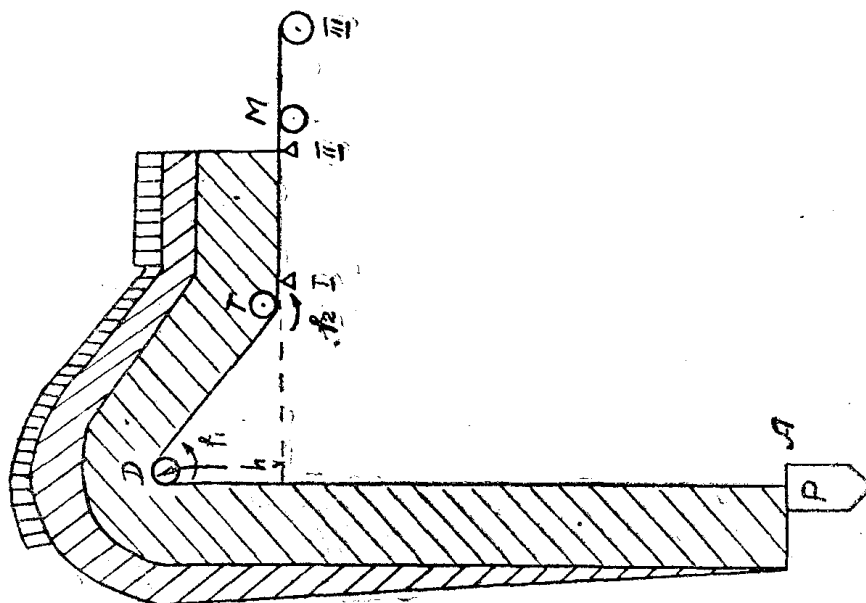
2) растягивающее влияние собственного веса q проволоки является величиной переменной—изменяется (в пределах данного участка) снизу вверх (увеличиваясь) и, кроме того, зависит от положения проволоки: при вер-



Фиг. 13

тикальном положении оно максимальное, при горизонтальном (без провеса) равно нулю;

3) любой вертикально расположенный участок проволоки растягивается с силой, равной а) весу нижевисящей части проволоки, б) половине веса проволоки данного участка;



Фиг. 12

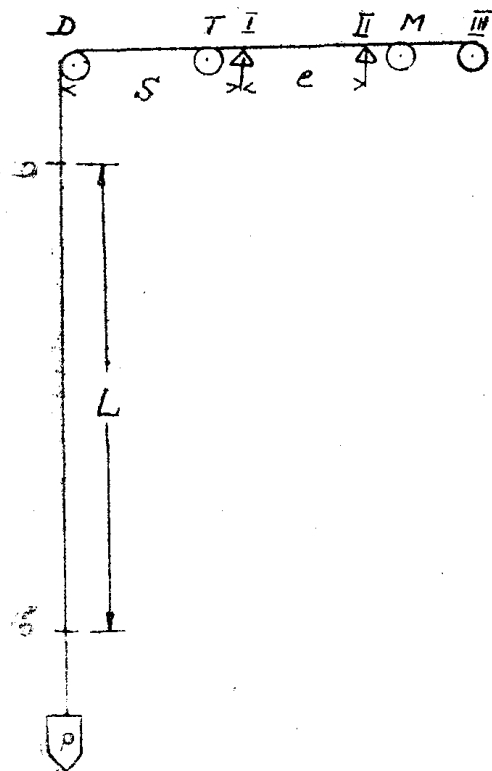
4) сила, с которой действует наклонный участок проволоки на соседние участки, определяется весом проволоки, длина которой равна разности горизонтов h концов наклонного участка;

5) растяжение проволоки под действием собственного веса q и груза P вправо от точки D (см. графики) искажается за счет трения в блоках.

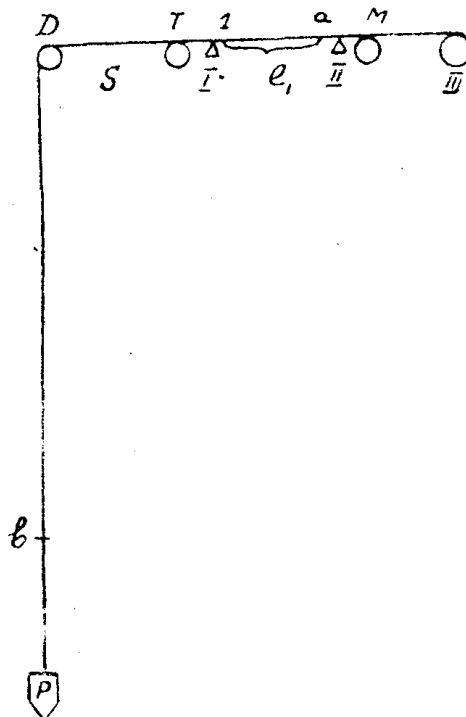
Это искажение, случайное по величине и знаку, точному учету не поддается.

Из приведенного анализа следует, что поправка ΔL_q в значительной степени зависит от схемы измерения—расположения проволоки вправо от точки D .

На фиг. 14 показан исходный момент измерения глубины шахты по первому способу, при расположении блоков D и T на одном горизонте;



Фиг. 14



Фиг. 15

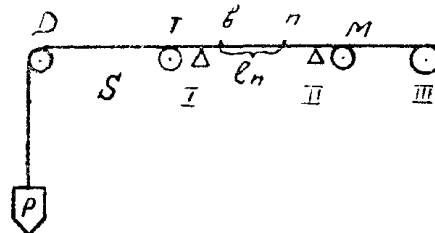
на фиг. 15 и 16—момент измерения первого и последнего отрезка l . В связи с подъемом проволоки происходит ее сокращение на участках $D-I$, $I-II$ (компаратор) и $II-III$; однако, на результат измерения L влияет сокращение проволоки только на участке $D-I$ и $I-II$. Изменение длины проволоки вправо от точки II вызывает равные перемещения крайних мест без изменения длины между ними. Сокращение любого отрезка l , переведенного в горизонтальное положение, вызывается изменением натяжения за счет прекращения действия собственного веса проволоки длиной $s + \frac{l}{2}$. Это изменение натяжения для отрезка l равно

$$Q = \gamma s F + \gamma \frac{l}{2} F,$$

где F — площадь поперечного сечения проволоки.

Сокращение Δl_q отрезка l , соответствующее силе Q , по закону Гука равно

$$\Delta l_q = \frac{\gamma}{E} l s + \frac{\gamma}{2E} l^2.$$



Фиг. 16

Общая поправка ΔL_q к длине L равна сумме поправок Δl_q к отдельным отрезкам l .

$$\Delta L_q = \frac{\gamma}{2E} (2sL + \Sigma l^2). \quad (11)$$

При $l_1 = l_2 = \dots l_{n-1} = l, l_n = P$, где P —остаток меньший l , будем иметь

$$\Delta L_q = \frac{\gamma}{2E} (2sL + lL' + P^2), \quad (12)$$

где $L' = L - P$.

При $P = 0$ или $P = l$ формула (11) будет иметь вид

$$\Delta L_q = \frac{\gamma}{2E} L (2s + l).^1) \quad (13)$$

При расположении блоков D и T на различных горизонтах влияние собственного веса проволоки на результат измерения будет несколько иным, чем это имело место при расположении их на одном горизонте.

На фиг. 12 блок T располагается ниже блока D . Изменение растягивающего усилия в этом случае за счет подъема отрезка l будет равно

$$Q = \gamma F \left(s + h + \frac{l}{2} \right).$$

При расположении блока T выше блока D , Q выражается формулой

$$Q = \gamma F \left(s - h + \frac{l}{2} \right).$$

В соответствии с этим формулы (11), (12), (13) будут иметь вид

$$\Delta L_q = \frac{\gamma}{2E} \left[2L(s \pm h) + \Sigma l^2 \right] \quad (14)$$

$$\Delta L_q = \frac{\gamma}{2E} \left[2L(s \pm h) + L'l + P^2 \right] \quad (15)$$

$$\Delta L_q = \frac{\gamma}{2E} L \left[2(s \pm h) + l \right] \quad (16)$$

В формулах (14)–(16) знак плюс при h соответствует положению блока D выше блока T , минус при h принимается при расположении блока D ниже блока T .

При $h = 0$ формулы (14)–(16) обращаются в формулы (11)–(13). Таким образом формулы (14)–(16) являются общими.

Полученные формулы справедливы, когда входящие в них величины выражены в системе CGS.

Для случая, когда E выражено кг/см^2 , а длины—в м , будем иметь

$$\Delta L_{qm} = \frac{\gamma}{20E} \left[2L(s \pm h) + \Sigma l^2 \right] \quad (17)$$

$$\Delta L_{qm} = \frac{\gamma}{20E} \left[2L(s \pm h) + L'l + P^2 \right] \quad (18)$$

$$\Delta L_{qm} = \frac{\gamma}{20E} L \left[2(s \pm h) + l \right]. \quad (19)$$

¹⁾ Впервые данная формула получена мной в 1938 г.

Формулы (17) — (19) остаются справедливыми и для случая измерения глубины шахты по второму способу как при спуске проволоки в рудник, так и при подъеме ее на поверхность.

Исследование формул (17) — (19) показывает, что поправку ΔL_q во всех случаях практики (при $l_1 \cong l_2 \cong l_3 \cong \dots \cong l_{n-1}$ и при любом значении остатка P) достаточно вычислять по формуле (19).

О степени искажения ΔL_q , вычисленной по формуле (9)

Доказав принципиальную неточность формулы (9), необходимо подчеркнуть недопустимость применения этой формулы и с практической точки зрения. С этой целью в помещенной ниже табл. 1 приведены значения ΔL_q , вычисленные по формуле (9) и (19), разность соответствующих поправок и их отношение.

При вычислении ΔL_q по формуле (19) было принято

$$l = 10 \text{ м.}$$

$$s \pm h = 5 \text{ м.}$$

Таблица 1

L в м	ΔL_q в мм		Разность $\Delta L_{q_{19}} - \Delta L_{q_{29}}$	Отношение $\frac{\Delta L_{q_{19}}}{\Delta L_{q_{29}}}$
	По формуле (9)	По формуле (19)		
100	2	0,4	1,6	5
200	8	0,8	7,2	10
300	18	1,2	16,8	15
400	32	1,6	30,4	20
500	50	2,00	48,0	25

Как видно из табл. 1, поправка ΔL_q , определенная по формуле (9), получается в десятки раз искаженной по сравнению с ее фактической величиной, определенной по формуле (19). Степень этого искажения пропорциональна глубине шахты и равна отношению

$$\frac{L}{2(s \pm h) + l} \quad (20)$$

Погрешность за счет дополнительного (от времени) растяжения проволоки под действием груза и собственного ее веса

В книге „Вопросы маркшейдерского искусства“ (дополнение к курсу „Маркшейдерское искусство“) издания 1936 г. проф. И. М. Бахурин говорит: „... проволока во время измерения, которое продолжается от часа до нескольких часов, смотря по глубине шахты, может получить добавочное (от времени) растяжение к тому, какое было во время нанесения меток“. Это добавочное от времени растяжение проволоки и является одним из источников погрешности измерения глубины шахты.

В литературе по вопросу упругой деформации говорится, что скорость деформации равна скорости звука и что растяжение от времени, хотя и имеет место, однако является величиной второго порядка даже в течение весьма длительного промежутка времени, по сравнению с которым время, необходимое для измерения глубины шахты, составляет ничтожную величину. Из этих соображений можно прийти к заключению, что рассматриваемая нами погрешность не имеет практического значения. Однако в связи с тем, что на величину этой погрешности оказывает влияние не только фактор времени, но и длина проволоки, которая при измерении

глубины шахты обычно выражается сотнями метров, окончательное решение вопроса о влиянии растяжения от времени на результат измерения может быть сделано только на основании опытных данных, что является задачей дальнейших экспериментов.

Погрешность за счет трения в блоках

В действующей в настоящее время „Технической инструкции по производству маркшейдерских работ“ и в специальной маркшейдерской литературе не указывается влияние трения в блоках на точность измерения глубины шахты проволокой. На практике это обстоятельство приводит к использованию произвольных блоков, в том числе малого диаметра, с нешлифованными осями и без употребления смазки. Имеет место использование ржавых и с загрязненными осями блоков, обладающих большим коэффициентом трения.

Анализ влияния силы трения в блоках на точность измерения глубины шахты проволокой показывает, что оно в некоторых случаях может достигать значительных размеров и должно быть отнесено к разряду случайных ошибок. Сила трения возрастает с возрастанием действующего на блок груза и коэффициента трения блока. Кроме того, она зависит от диаметра блока и его оси: прямо пропорциональна диаметру оси и обратно пропорциональна диаметру блока.

Погрешность за счет трения есть результат деформации проволоки на участке I—II (фиг. 12)—для первого способа измерения глубины, и D—T и I—II—для второго способа измерения, под влиянием дополнительного усилия на указанных участках, направленного на преодоление силы трения.

Натяжение проволоки на участках D—T и T—II в процессе измерения не остается постоянным, а изменяется (увеличиваясь при спуске проволоки в рудник и уменьшаясь при подъеме ее на поверхность) за счет изменения веса свободно висящей проволоки.

На фиг. 17 груз P , равный весу отвеса и весу свободно висящей проволоки, удерживается в равновесии силой R . Груз P и сила R действуют на блок D с силой N . Указанные усилия связаны между собой следующей функциональной зависимостью (из уравнения моментов вращения):

Фиг. 17

$$R = N \frac{d_0}{d} \mu + P, \quad (21)$$

где d — диаметр блока, d_0 — диаметр оси, μ — коэффициент трения.

Сила N , как равнодействующая P и R , равна

$$N^2 = R^2 + P^2 + 2PR \cos \gamma. \quad (22)$$

Из уравнения (21) и (22) можем написать

$$R^2 + P^2 + 2PR \cos \gamma = (R - P)^2 \frac{d^2 \sigma}{d_0^2 \mu^2},$$

или

$$R_2 + 2PR \frac{d_0^2 \mu^2 \cos \gamma + d^2 \sigma}{d_0^2 \mu^2 - d^2 \sigma} + P^2 = 0,$$

откуда

$$R = P \left[\frac{d_0^2 \mu^2 \cos \gamma + d^2 \sigma}{d^2 \sigma - d_0^2 \mu^2} \pm \sqrt{\left(\frac{d_0^2 \mu^2 \cos \gamma + d^2 \sigma}{d^2 \sigma - d_0^2 \mu^2} \right)^2 - 1} \right] \quad (23)$$

Знак плюс перед корнем в формуле (23) соответствует измерению при подъеме проволоки, минус — при спуске ее в рудник.

Если в формулу (23) подставить значения d_0 , d_6 , μ и γ для блока D , то получим силу натяжения R_1 для проволоки на участке $D-T$. Сила натяжения R_2 для проволоки на участке $I-II$ вычисляется по формуле

$$R_2 = R_1 \left[\frac{d_0^2 \mu^2 \cos \gamma + d^2 \sigma}{d^2 \sigma - d_0^2 \mu^2} \pm \sqrt{\left(\frac{d_0^2 \mu^2 \cos \gamma + d^2 \sigma}{d^2 \sigma - d_0^2 \mu^2} \right)^2 - 1} \right], \quad (24)$$

где параметры d_6 , d_0 , μ и γ относятся к блоку T .

При употреблении неисправных блоков возможны случаи как частичного, так и полного прекращения свободного вращения их на оси (заедание). При наличии такого состояния происходит трение между проволокой и блоком. Сила натяжения R в этом случае может быть определена по формуле Эйлера

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= P e^{\mu \alpha} \\ R_2 &= R_1 e^{\mu \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где e — основание натуральных логарифмов,

α — угол обхвата (фиг. 17).

Усилие, возникающее как следствие силы трения в блоках, определяется по разности R и P , т. е.

$$f = R - P. \quad (26)$$

Максимальное значение этой разности будет при измерении первого отрезка, минимальное — при измерении последнего (если измерение производится при подъеме; при спуске картина будет обратной).

Линейная величина погрешности измерения длины проволоки за счет силы трения в блоках при измерении по первому способу может быть определена следующим образом. Любой измеряемый отрезок l проволоки получает за счет силы трения в блоках дополнительное натяжение, равное, как указано выше, f . Дополнительное натяжение проволоки сопровождается ее деформацией Δl_f , определяемой по формуле

$$\Delta l_f = - \frac{f}{E F} l.$$

Общая (максимальная) деформация ΔL_f проволоки длиной L равна сумме деформаций отдельных отрезков l . Если отдельные отрезки l равны между собой, то будем иметь

$$\Delta L_f = - \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_n}{E F} l.$$

Выражение $f_1 + f_2 + \dots + f_n$ является суммой членов арифметической прогрессии, где f_1 соответствует f_{max} , а $f_n = f_{min}$. Таким образом, окончательное выражение ΔL_f может быть написано в следующем виде:

$$\Delta L_f = - \frac{f_c}{E F} L, \quad (27)$$

где E — модуль упругости проволоки в $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$;

F — площадь поперечного сечения проволоки в см^2 ,

L — общая измеренная длина проволоки в м ,

f_c — вычисляется по формуле

$$f_c = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2} n, \quad (28)$$

f_{\max} определяется по разности $R_{\max} - P_{\max}$.

R_{\max} вычисляется по формуле (24) при условии, что R_1 определено при значении P_{\max}

$$P_{\max} = P + q(L' - l - s), \quad (29)$$

где P — вес отвеса в кг ;

q — вес одного пог. м проволоки в кг ;

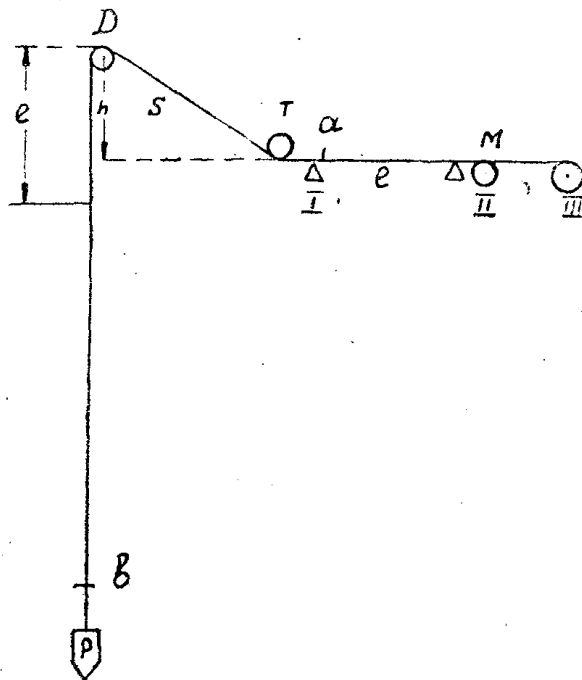
L' — свободно висящая часть проволоки (от верхней метки до отвеса в м).

При вычислении f_{\min} значение R_{\min} определяется также по формуле (24).

R_1 в этом случае определяется на основании P_{\min}

$$P_{\min} = P + q(L' - L - s). \quad (30)$$

Если измерение глубины шахты производится при подъеме проволоки, но по второму способу, то ΔL_f имеет иной вид, чем это дано для первого способа (27). Новый вид выражения ΔL_f может быть получен, исходя из следующих соображений. При измерении первого отрезка l на компаратор поступает проволока длиной s и $l - s$, натяжение которых в исходный момент соответственно было R_1 и P_1 . На компараторе измеряемый отрезок l имеет натяжение R'_2 . На участке $D-T$ (фиг. 18), в момент измерения первого отрезка, натяжение равно R'_1 . Создавая таким образом разность в натяжении проволоки вследствие ее перемещения сопро-



Фиг. 18

вождается деформацией, в связи с чем на поверхность будет поднят отрезок, отличный от l , равный $l + \Delta l_f$, где

$$\Delta l_f = - \frac{R'_2 - R'_1}{E F} s - \frac{R'_2 - P_1}{E F} (l - s) - \frac{R'_1 - P_1}{E F} s$$

или

$$\Delta l_f = \frac{R'_1 - R'_2}{E F} s - \frac{R'_2 - P_1}{E F} l$$

Общая максимальная деформация ΔL_f проволоки длиной L равна сумме деформаций отдельных отрезков l , что при условии равенства этих отрезков между собой, с учетом (26) (28), выражается формулой

$$\Delta L_f = \frac{\Delta R}{E F} s - \frac{t_c}{E F} L, \quad (31)$$

где

$$\Delta R = R_1^n - R_1^k. \quad (32)$$

В выражении (32) R_1^n — начальное натяжение проволоки (в момент нанесения меток) на участке $D - T$, вычисляемое по формуле (23) при исходном значении P , равном

$$P = p + qL'', \quad (33)$$

где L'' — свободно висющая часть проволоки (от блока до отвеса) в м;

R_1^k — конечное натяжение проволоки на участке $D - T$ (при измерении последнего отрезка), определяемое по формуле (23) при минимальном значении P

$$P_{min} = P + q(L'' - L). \quad (34)$$

Входящая в формулу (31) величина f_c определяется из выражения (28) по разностям максимального и минимального значений R и P . R_{max} и P_{min} определяются по формуле (24) при значении R_1 , вычисленном на основании P_{max} и P_{min} . Максимальное значение P равно

$$P_{max} = P + q(L'' - l). \quad (35)$$

Если измерение глубины шахты производится при спуске проволоки в рудник, то, рассуждая аналогично предыдущему, можем написать

$$\Delta L_f = - \frac{\Delta R_1}{E F} s - \frac{f_c}{E F} L, \quad (36)$$

где ΔR_1 вычисляется по формуле (32) при условии, что R_1^n вычисляется при минимальном значении P , определяемом по формуле (34), а R_1^k — при конечном значении P , определяемом по формуле (33).

Так как $R_1^n < R_1^k$, а $R_2 < P$, то ΔL_f в данном случае имеет положительное значение и равна сумме слагаемых выражения (36). На этом основании заключаем, что выражения (31) и (36) отличаются друг от друга только знаком при втором члене и, следовательно, могут быть заменены следующей общей формулой:

$$\Delta L_f = \frac{|\Delta R_1|}{E F} s \pm \frac{|f_c|}{E F} L. \quad (37)$$

Знак плюс в формуле (37) соответствует измерению при спуске проволоки в рудник, минус — при подъеме ее на поверхность.

В связи с тем, что при малейшем обратном движении блоков сила трения меняет знак на обратный, ΔL_f имеет случайный характер и, таким образом, формулы (27), (37) позволяют определить лишь максимальное значение этой погрешности.

Величина погрешности ΔL_f в зависимости от состояния блоков, схемы измерения и глубины шахты колеблется в широких пределах: от 0 до 0,5 м и более.

Из этого следует, что погрешность за счет трения в блоках целиком зависит от состояния самих блоков, их конструкции и размеров. Употребление неисправных блоков совершенно недопустимо, так как может привести к резкому искажению результата.

Влияние трения в блоках может быть резко снижено путем уменьшения отношения $\frac{d_0}{d_s}$ (главным образом за счет увеличения d_s), удаления с оси блока грязи, ржавчины и применения смазки. Оно может быть сведено практически к нулю путем применения блоков с шариковыми подшипниками, коэффициент трения которых выражается тысячными долями единицы. Определение глубины, как среднее из измерений при спуске и подъеме, также ведет к снижению влияния трения в блоках.

Погрешность за счет продольных (вертикальных) колебаний проволоки

При спуске и подъеме отвеса, а следовательно, и проволока, совершает продольные колебания. Эти колебания возникают под действием преодоления силы инерции покоя в начале измерения и инерции движения в момент прекращения спуска или подъема проволоки. Кроме того, они возникают в связи с внезапным изменением скорости или направления движения отвеса, а также под действием различных внешних причин. Во время колебаний отвеса проволока находится под действием динамической нагрузки. Деформация проволоки при наличии колебательных движений является величиной переменной и изменяется от нуля до удвоенного значения ее при статическом приложении этой нагрузки. Таким образом, выполнение любых измерительных операций в то время, когда колебания еще не затухли, может привести к искажению результата, абсолютное значение и знак которого является величиной переменной. Вероятность появления ошибки за счет колебаний отвеса тем больше, чем больше период колебания T , определяемый (без учета конкретных условий) по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P L'}{E F g}}, \quad (38)$$

$$\text{где } P = P + \frac{q L'}{3},$$

g — ускорение силы тяжести. При $P = 10 \text{ кг}$, $q = 0,014 \text{ кг}$, $L' = 500 \text{ м}$, период колебания равен $\approx 1 \text{ сек}$.

Так как погрешность за счет колебаний проволоки не может быть учтена при обработке вследствие случайного ее характера, то она должна быть исключена в процессе измерения. С этой целью все измерительные операции должны проводиться после затухания наиболее резких колебаний. Время, необходимое для затухания указанных колебаний, должно быть определено опытным путем перед началом измерения глубины. Если при расчете веса отвеса не учитывать динамического действия последнего и трения в блоках, то в результате колебаний в проволоке могут возникнуть напряжения, лежащие за пределами упругой деформации. В этом случае проволока будет подвержена пластической деформации, и результат измерения будет искажен.

Погрешность за счет изменения силы тяжести с глубиной

Измерение глубины шахты проволокой, как указано выше, производится путем последовательного перемещения проволоки в рудник или подъема ее на поверхность.

Так как на различных горизонтах сила тяжести имеет различное значение, то и натяжение проволоки, а следовательно, и деформация ее в процессе измерения является величиной переменной. Интересующее нас среднее изменение ΔG_{cp} силы тяжести, при разности горизонтов h , определяется по формуле

$$\Delta G_{cp} = \frac{1}{2} m \cdot \Delta g_{max}, \quad (39)$$

где m — масса груза (отвеса), подвешенного к проволоке,

Δg_{max} — максимальное изменение ускорения силы тяжести, определяемое по формуле

$$\Delta g_{max} = g_0 (0,0000003 h), \quad (40)$$

где g_0 — средняя величина ускорения силы тяжести на поверхности земли.

При глубине шахты в 1000 м и натяжении в 10 кг

$$\Delta G_{cp} = 1,5 \text{ г.}$$

Из приведенного примера следует, что погрешность, зависящая от изменения силы тяжести с глубиной, практического значения не имеет.

Погрешность за счет неточного знания длины ленты (компаратора)

Измерение отдельных отрезков проволоки при измерении глубины шахты производится обычно с помощью стальной ленты (рулетки), длина которой известна с определенной степенью точности. Неточное знание длины ленты (компаратора) вызывает погрешность результата. Величина этой погрешности выражается формулой

$$m = \pm \lambda L, \quad (41)$$

где λ — погрешность единицы длины ленты (компаратора),

L — измеренная длина проволоки.

Согласно действующей в настоящее время технической инструкции по производству маркшейдерских работ измерение проволоки можно производить лентой, длина которой известна с относительной ошибкой, равной $\frac{1}{40000}$; следовательно, погрешность измерения глубины шахты в этом случае будет равна

$$m = \pm 0,000025 L,$$

что составляет 2,5 мм на каждые 100 м, или 1 см на 400 м глубины. Как видно из приведенного примера, эта погрешность оказывает существенное влияние на точность результата измерения глубины шахты, в связи с чем желательно применение более точных измерителей.

Погрешность за счет разности стрел провеса проволоки на участке $D-T$ в начале и в конце измерения

Участок проволоки $D-T$ (фиг. 2) имеет свободный провес. Натяжение этого участка в исходный момент и в процессе измерения не остается постоянным: уменьшается при подъеме проволоки и увеличивается при спуске её в рудник.

Не остается постоянным в процессе измерения и стрела провеса этого участка: она возрастает при подъеме проволоки и уменьшается при спуске.

Таким образом, перемещение штриха „а“ (или штриха „b“) происходит не только в связи с подъёмом проволоки и сокращением ее под влиянием изменения собственного веса, но и в связи с изменением стрелы провеса проволоки на участке $D-T$.

Общее перемещение штриха „а“ (или „b“), вызванное изменением стрелы провеса, равно разности длины кривой (проволоки) этого участка в конце измерения и в исходный момент, или, что все равно, разности поправок за приведение указанных кривых к их хорде и может быть определено по формуле

$$\Delta L_f = \frac{8 |f_1^2 - f_0^2|}{3l}, \quad (42)$$

где f_0 — стрела провеса проволоки на участке $D-T$ в исходный момент,

f_1 — то же в конце измерения,

l — длина измеряемого отрезка проволоки.

Знак поправки ΔL_f , вычисленной по формуле (42), получается автоматически, следовательно, поправка ΔL_f всегда положительна и не зависит от направления движения отвеса.

Для любого возможного в практике значения L величина ΔL_f составляет доли миллиметра и, таким образом, она не имеет практического значения.

Из приведенного примера следует, что данным источником погрешности практически можно пренебречь.

Погрешность за счет смещения ленты (компаратора) в процессе измерения

Погрешность за счет смещения ленты в процессе измерения присуща только второму способу измерения глубины и равносильна смещению исходного штриха. По величине и знаку она имеет случайный характер и не может быть выражена аналитически. Прочное закрепление ленты и неподвижность приспособления, на котором она закрепляется, вполне гарантируют измерения от указанной выше ошибки. Кроме того, она может быть обнаружена и учтена при обработке, если измерение отдельных отрезков проволоки производить по методу, описанному В. К. Юзефовичем, отмечая положение коллимационных плоскостей теодолитов по неподвижным точкам.

Заключение

Вопросу измерения глубины шахты, как указано выше, до сего времени уделялось крайне мало внимания. Особенно это относится к широко распространенному в практике способу измерения глубины проволокой. Это обстоятельство подчеркнуто проф. И. М. Бахуриным в упомянутой выше его работе, где им поставлен вопрос о необходимости проведения исследований в данной области.

Настоящая работа, таким образом, является попыткой решения выдвинутой проф. И. М. Бахуриным задачи о всестороннем изучении источников погрешностей при измерении глубины шахты проволокой.

Если учесть, что за последнее время в литературу, а следовательно, и в производство проникли ошибочные представления о некоторых источниках погрешностей, искажающих результат измерения, то своевременность и значение данной работы, по нашему мнению, не вызывают сомнений.

Из работы прежде всего следует, что наибольшее влияние на точность измерения глубины шахты оказывает температура проволоки в процессе выполнения различных измерительных операций. На это именно обстоятельство и должно быть обращено самое серьезное внимание при решении данной задачи. Доказана ошибочность применяемой в настоящее время формулы поправки за растяжение проволоки под действием собственного веса и дана новая формула, из которой следует, что эта погрешность почти не имеет практического значения.

Проведенный анализ позволил установить и практически оценить целый ряд таких источников погрешностей, о которых до сего времени вообще в литературе не упоминалось (трение в блоках, продольные колебания проволоки и др.).

Работа в целом, по нашему мнению, в значительной степени восполняет тот пробел, который имеет место в данном вопросе, и должна послужить основанием для пересоставления соответствующего раздела „Технической инструкции по производству маркшейдерских работ“.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бахурин И. М.—Вопросы маркшейдерского искусства. Дополнение к „Курсу маркшейдерского искусства“, 1936.
 2. Бауман В. И.—Курс маркшейдерского искусства, ч. 2, 1932.
 3. Оглобин Д. Н.—Маркшейдерская съемка горных выработок, 1944.
 4. Братгун О.—Практическое руководство маркшейдерского искусства, 1903.
 5. Маркшейдерский справочник, 1938.
 6. Труды ЦНИМБ, № 11, 1940.
 7. Записки Ленинградского горного института, т. 8, 1934.
 8. Гребер Г.—Введение в теорию теплопередачи, 1933.
 9. Хвольсон О. Д.—Краткий курс физики, ч. 3, 1923.
 10. Тимошенко С. П.—Курс сопротивления материалов, 1930.
 11. Добровольский В. А.—Детали машин, 1939.
 12. *Hütte*—Справочник инженера, т. 1, 1930.
 13. Техническая инструкция по производству маркшейдерских работ, 1938.
-